J. Lake Sci.(湖泊科学),2007,**19**(2):170-176
http://www.jlakes.org. E-mail: jlakes@niglas.ac.cn
© 2007 by *Journal of Lake Sciences*

中尺度流域次降雨洪水过程模拟——以太湖上游西苕溪流域为例*

万荣荣,杨桂山,李恒鹏,杨丽霞
(中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

摘　要:以太湖上游西苕溪流域为研究对象,通过分布式水文模型 HEC-HMS 模拟次降雨洪水过程:采用可视化数据存储系统 HEC-DSS 建立水文气象数据库,利用 Geodatabase 地理数据库技术集成流域自然属性数据库,通过距离平方倒数法对雨量数据进行空间插值,SCS 曲线数法计算水文损失,运动波法计算直接径流与河道洪水演进,选用基流指数退水法模拟流域基流,并对模型中水库模拟部分进行适当修正.经模型校验,模拟结果表明,计算流量与观测流量拟合较好,效率系数大于 0.8,洪峰流量误差低于 4%,峰现时间误差低于 2 h,该模型在土地利用变化对洪水水文要素的影响研究方面有较好的应用前景.
关键词:水文模型;次洪水过程;模拟;太湖流域

Simulating flood events in mesoscale watershed: a case study from River Xitiaoxi Watershed in the upper region of Taihu Basin

WAN Rongrong, YANG Guishan, LI Hengpeng & YANG Lixia
(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing* 210008, *P. R. China*)

Abstract: Flood events in River Xitiaoxi Watershed in the upper region of Taihu Basin were simulated by distributed hydrologic modeling system HEC-HMS. The database of hydrology and meteorology in studied region was set up by visual storage system HEC-DSS. The database of the natural attributes of basin was integrated by the technique of GIS Geo-database. The total storm mean area precipitation was calculated by inverse-distance-squared method. SCS Curve Number Loss Model was selected to compute runoff volumes. Kinematic-wave Model was used to model direct runoff and channel flow. Base flow was modeled by Exponential Recession Model and the reservoir model was improved. After calibration and validation, the simulated flow and observed flow fit so good that the efficiency coefficient was more than 0.8, with error of peak flow within 4%, and error of peak flow time within 2 hours, which illustrated that HEC-HMS may be applicable area in simulating the impacts of land use change on hydrological regimes such as floods.
Keywords: Hydrologic model; flood events; simulate; Taihu Basin

近 1000 多年来太湖流域的洪涝变化出现"稀少期"与"频繁期"交替转换的规律,20 世纪是洪涝灾害发生最为频繁的时期[1].20 世纪 90 年代以来,太湖流域连续出现流域性或区域性洪水,大小洪水达 6 次之多,特别是 1991 年和 1999 年的两次特大洪水,对太湖流域影响重大,引起了人们的普遍关注.虽然气候因素是形成洪涝灾害的重要原因,但近年来的许多研究表明,土地利用/覆被变化对太湖流域的洪涝灾害有着重要的影响[2-4].本文拟以太湖上游西苕溪流域为对象,通过分布式水文模型 HEC-HMS 模拟次降雨洪水过程,为深入系统研究 LUCC 对短时间尺度降雨洪水过程的影响提供科学的技术支撑.

* 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX3-SW-331).2006-05-29 收稿;2006-08-24 收修改稿.万荣荣,女,1977 年生,博士,助理研究员.E-mail:rrwan@niglas.ac.cn

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

西苕溪流域位于太湖上游,对全流域洪水影响重大. 西苕溪是太湖上游的重要支流,流域水量、泥沙含量及水质均对太湖水环境有重要影响. 西苕溪流域年均注入太湖的水量约占太湖年均入湖水量的27.7%[5]. 本文以西苕溪流域横塘村流量站以上的地区为对象(图1),面积1273 km^2,人口32万. 属亚热带季风性气候区,年平均气温为15.5℃,多年平均降水量为1465.8 mm. 径流年内变化与降水基本一致,呈双峰型,峰值出现在5-6月份和9月份,5-9月径流量占全年径流量的45%-54%. 流域土地利用类型多样,上游为山丘区以林地为主;中游丘陵区林地农田并重;下游平原区以水田为主.

1.2 研究方法

1.2.1 水文模型的选择 水文模型可以分为:集总式与分布式模型、系统理论模型与概念性模型、确定性模型与随机模型,可用于次径流模型与连续径流模拟,模型参数可采用观测值与模型参数率定方法. 根据研究目的选择结构和特点较为合适的水文模型,本研究的目的是揭示LUCC对短时间尺度洪水过程的影响,并为反映不同土地利用类型和水文过程的区域差异及流域参数的变化提供技术手段.

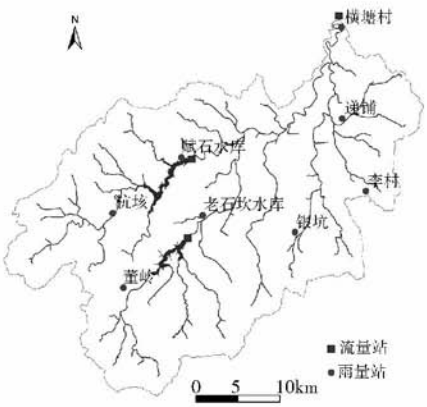


图1 西苕溪流域观测站点分布

Fig. 1 Flow and precipitation gages in River Xitiaoxi Basin

HEC-HMS是美国陆军兵团(US Army Corps of Engineer, USACE)水文工程中心(Hydrologic Engineering Center, HEC)开发的水文模型系统[6],是洪水过程模型HEC-1的改进与替代版. HEC-HMS模型系统用相互联系的水文和水力成分表示流域水文过程,由降雨模拟直接径流过程、洪水演进过程,是较为全面的次降雨径流模拟模型,模型考虑了河流的汇合、分叉以及导流渠、水库等水利设施的影响,并且兼容多数据源数据,如雷达雨量数据、HEC-DSS[7]数据、HEC-GeoHMS[8]数据,模型具模块化结构,可根据需要进行分布式、半分布式或集总式模拟.

1.2.2 数据库的建立 利用可视化数据存储系统HEC-DSS建立流域雨量数据库和流量数据库. 将流域内8个雨量站1983-1999年典型洪水的雨量时间序列数据和3个流量站同期流量观测数据输入数据库HEC-DSS. 利用HEC-DSS的数学函数功能将不规则时间序列数据进行时间插值,转换成规则时间序列数据,得到每场降雨1 h积累雨量数据序列和每次洪水的1 h步长观测流量数据序列.

所采用的数据资料主要是1984年、1995年Landsat TM多光谱遥感影像,1∶50000地形图,1∶100000土壤图. 运用RS和GIS技术进行遥感影像预处理、辐射纠正和几何纠正、图像配准,所有的数据均转换为统一的坐标系和投影(Albers投影),中央经线为105°E,双标准纬线为25°N、47°N,采用KRASOVSKY椭球体. 通过遥感数据目视解译,建立土地利用空间数据库. 按照SCS对土壤水文类型的划分,将土壤分为4大类型(HSG)[9],与土地利用图迭加得到水文响应单元(HRU). 运用ArcView软件模块HEC-GeoHMS对DEM进行处理,提取河网水系,划分子流域,并建立流域自然属性数据库. 利用Geodatabase地理数据库技术将流域1∶50000数字地形、土壤、土地利用、流域集水系统结构进行集成.

2 次降雨洪水过程模拟

2.1 雨量数据空间插值

降雨具有空间分异的特点,由于流域的点降雨观测非常有限,在水文分析中需要计算流域面平均降雨量. 距离平方倒数法(RDS)把无测站点的降雨视为附近雨量站点降雨和该点与雨量站点间距离的函数,且对较近的站赋予较大的权重,该法考虑了降雨分布的影响,在计算中无需求分布方程[10,11].

通过距离平方倒数法计算出每个子流域每场降雨每小时面平均雨量. 为了验证距离平方倒数法计算的

面雨量的精度,将其与 GIS 空间插值得到的栅格日雨量比较,如对 1983 年 5 月 27 日 - 6 月 3 日雨量的计算,距离平方倒数法得出 57 个子流域面平均雨量为 157.6 mm,栅格计算结果为 159.0mm,两者仅相差1.4 mm,说明距离平方倒数法计算的面雨量精度较高,可以反映流域降雨的空间差异.

2.2 水文损失计算

选择美国土壤保持局的 SCS 曲线数(Curve Number, CN)法,目前该模型在美国及其他一些国家得到了广泛的应用[12-14],在我国也有一些介绍和应用[15,16].

SCS 模型有其特有的土壤分类系统. 本文以《湖州市土壤》①和《安吉土壤》②的土壤分类方法和土壤分类图为基础,根据土壤物理性质,对土壤类型进行了适当的归并,得到符合 SCS 模型的土壤分类结果. 根据 SCS 模型提供的 CN 值查算表[17,18],充分考虑西苕溪流域的自然条件,参考有关研究者在 SCS 模型应用中所确定的 CN 值距阵[14,15,19,20]确定了西苕溪流域 CN 值距阵(表 1).

表 1 西苕溪流域 CN 值(AMCII)

Tab. 1 Curve number of Xitiaoxi Watershed (AMCII)

HSG	A	B	C	D
水田	63	75	83	87
旱田	67	78	85	89
自然林	30	55	70	77
疏林灌丛	32	58	72	79
园地	40	62	76	82
草地	55	68	78	84
河流	98	98	98	98
水库、池塘	0	0	0	0
城镇、工矿及道路	98	98	98	98
农村居民地	82	86	91	92
裸岩、滩地及沙地	80	87	92	96
裸土	72	82	88	90

根据西苕溪流域 1983 - 1984 年次降雨径流的逐日资料,对 SCS 模型在研究地区的应用进行了验证. 利用 50 m × 50 m 栅格日降雨、50 m × 50 m 栅格 CN 参数计算 1983 - 1984 年 4 次洪水的栅格日产水量. 采用退水曲线法[21]将流域出口流量过程线进行基流分割,计算直接径流量(扣除基流的壤中流和地表径流),与栅格产水量进行比较,相对误差在 0.5% - 6.9% 之间,表明 SCS 模型可以用于该地区的暴雨产流计算.

2.3 运动波法计算直接径流与河道洪水演进

2.3.1 *计算方法* 运动波方法是运用连续方程和近似于恒定流的动力方程将降雨转换为径流.

坡面流为一维流,一维流的动力方程为:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} \tag{1}$$

式中, S_f为能坡(即摩擦比降);S_0为底坡;V 为流速;y 为水力深度;x 为水流经距离; $\partial y/\partial x$ 为压力梯度;$\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}$为对流加速度;$\partial V/g\partial t$ 为局部加速度[21,22].

另一个重要的方程即为一维连续方程:

① 湖州市土壤志编委会. 湖州市土壤. 1987.

② 安吉县土壤普查办公室. 安吉土壤. 1985.

$$A\frac{\partial V}{\partial x}+VB\frac{\partial y}{\partial x}+B\frac{\partial y}{\partial t}=q \tag{2}$$

式中,B 为水面宽度;q 为单位河段的侧流;$A\partial V/\partial x$ 为棱柱形槽蓄;$VB\partial y/\partial x$ 为楔形槽蓄;$B\partial y/\partial t$ 为水位上涨的速率[21,22]. 侧流代表净雨量,为面平均雨量与降雨损失量之差.

根据动力方程和连续方程,可推导运动波的运动方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t}+amA^{m-1}\frac{\partial A}{\partial x}=q \tag{3}$$

对于坡面流与河道流,运动波的求解方法是一致的:用有限差分法解偏微分方程;采集初始与边界条件;求解最终的代数方程,获得流量过程线. 坡面流由于无外界入流,初始条件 A 为 0. 运动波河道模型的初始条件和边界条件以上游流量过程线为基础. 边界条件,即超渗雨量或侧流,在一定的时间步长内是恒定的.

2.3.2 参数估计 运用 ArcView 平台,运用空间分析将子流域划分为汇流坡面、主流和支流,提取坡面参数:汇流长度、坡度、粗糙系数、汇流面占子流域面积百分比. 最小时间步长设定为 15 min. 提取河道参数:长度、坡度、形状、河底宽度或直径、支流集水面积. 当河道横断面形状设为"不等边四边形"时需要侧面坡度参数. "不等边四边形" 允许横断面为三角形、矩形和梯形,通过侧面坡度和底部宽度 2 个参数来确认. 河道最小距离步长设定为 50 m.

根据文献对不同土地利用/覆被的粗糙系数(N)进行了估算(表 2)[23]. 根据流域 24 个河道断面的观测,并结合参考文献[24,25]估计各河段 Manning 系数 n 值.

表 2 坡面流地表不同土地利用/覆被的粗糙系数[23]

Tab. 2 Overland-flow roughness coefficients for sheet-flow modeling

土地利用/覆被类型	耕地	林地	疏林灌丛	园地	草地	水域	建设用地	裸地	湿地
粗糙系数 N	0.17	0.80	0.40	0.30	0.15	0.01	0.011	0.011	0.05

2.3.3 基流指数退水 基流指数退水法适合于基流受降雨事件影响大的流域,因此本文选用基流指数退水法模拟流域基流.

指数退水模型常用来解释自然流域的基流[21]. 退水曲线(又称亏水曲线,因为它代表蓄水量的亏损),用下列方程式描述:

$$Q_t=Q_0k^t \tag{4}$$

式中,Q_0为初始时间的基流量;Q_t为 Q_0以后 t 时段的基流量;k 为小于 1.0 的退水常数. 在 HEC-HMS 模型中,k 被定义为 t 时刻的基流量占前一日基流量的比率.

2.4 模型校验

模型的参数有两种,第一种是流域的物理量量测值,其内含假设是模型具有物理基础. 第二种根据所选择的目标函数进行系统优选. 对 HEC-HMS 模型而言,部分参数可通过物理量测值得到,另一部分可用实测水文资料优化产生. 模型校验要完成率定和验证两个步骤.

2.4.1 参数优化法 参数优化是使目标函数值达到最小的过程. 选择加权均方差(RMS)作为参数优化的目标函数,加权均方差是对标准均方差的改进,权重因子以平均流量为基准,对标准均方差进行改进. 当流量大于平均值时,权重因子大于 1.0,当流量小于平均值时,权重因子介于 0.5 和 1.0 之间. 误差越大,权重越大,并且洪峰流量附近的误差总权重较大. 该方法是对两条水文过程线的峰值、流量、洪峰时间的综合比较,计算公式如下:

$$z=\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}[Q_o(t)-Q_s(t)]^2\frac{Q_o(t)+Q_A}{2Q_A}}{n}},Q_A=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}Q_o \tag{5}$$

式中,z 为目标函数,$Q_o(t)$为 t 时刻观测流量,$Q_s(t)$为计算流量,Q_A为实测流量平均值.

HEC-HMS 模型的参数优化方法包括单变量梯度法(Univariate gradient Search Algorithm)和 Nelder-Mead

法.单变量梯度法每次仅计算、调整一个参数值,假定其它参数为常量[26].由于并非所有的参数都需要调整,本文选择单变量梯度法进行参数优化.

2.4.2 模型校验结果 以1984年下垫面参数为基础,选择1983－1984年洪水期降雨径流资料用于模型的率定和验证.

研究区内的赋石和老石坎两大水库是为治理西苕溪洪涝灾害而兴建的大型水利工程.而HEC-HMS对于水库的模拟比较简单,模型认为水库出流受入流控制,即将出流作为上游水位的函数.如果出流受回水影响,或由于闸门的控制而使得蓄量－出流关系复杂化,模型往往不能正确反映.而赋石水库和老石坎水库都是由人为控制的复杂水库,如果按模型对简单水库的要求输入水位－库容－泄洪量关系,则不能正确反映水库的真实运行情况.

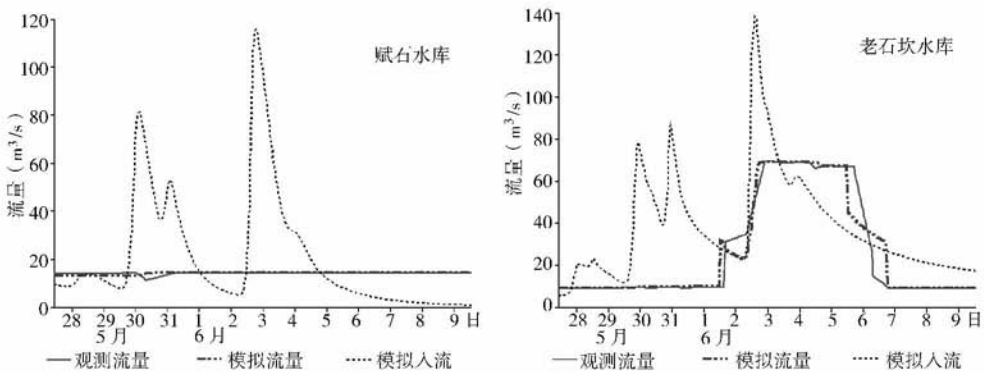


图2 1983年5－6月洪水期水库流量模拟

Fig. 2 Reservoir flow simulation during flood event from May to June in 1983

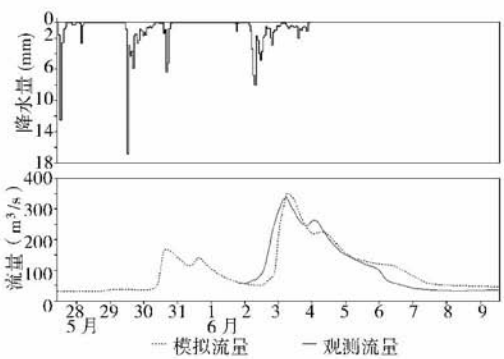


图3 横塘村流量站模型率定时期降雨径流模拟(1983年)

Fig. 3 Precipitation, observed and simulated flow for calibration period of River Xitiaoxi Basin at gate Hengtangcun

为了正确模拟洪水期水库出流,将模型的输入作适当的修正:1)结合水库控运计划,以每次洪水期实际的水位－库容－泄洪量关系为基础,求出每次洪水的水库调度曲线,作为模型的输入;2)对两水库联合调度的情况,将老石坎水库分洪的部分从出流中去除,作为赋石水库的上游入流来处理;3)如果水库没有严格按照调度曲线运行,或出现水库漏水等现象,从而不能很好地模拟水库出流,为了避免将水库模拟的误差带入水库下游,则将水库控制区从流域中去除,将水库出流作为水库下游子流域的入流.

对1983年5－6月洪水期水库模拟,赋石水库与老石坎水库的设计水位－库容－泄洪量关系改为洪水期实际水库调度曲线.经过参数优化,得到1983年5－6月洪水期水库流量过程线(图2).

从图2可看出,水库模拟流量过程与实测流量过程拟合较好.1983年5－6月洪水期赋石水库计算流量1.63×10^7 m³,实测流量1.65×10^7 m³,相对误差－0.85%,平均残差0.20 m³/s,效率系数为0.91;老石坎水库计算流量3.03×10^7 m³,实测流量3.05×10^7 m³,相对误差－0.46%,平均残差0.12 m³/s,效率系数为0.93.

在水库流量拟合之后,再以流域出口实测流量为基础,对水库下游子流域参数进行率定和验证.经参数敏感性分析,敏感性最强的参数是*Cn*值,敏感度在0－0.09之间,由于此参数已经过验证,无需进行优化;

其次是糙率系数 N,敏感度在 0 – 0.03 之间;其余参数,如初始亏损量、初始基流量、基流退水系数、退水拐点流量等,敏感度较低,低于 0.01,大多为 0.

选择 1983 年 5 – 6 月洪水期降雨径流观测资料对模型进行参数率定,如图 3,横塘村流量站计算流量与观测流量具有良好的一致性,效率系数为 0.83,洪峰流量误差 3.4%,峰现时间误差为 0. 选择 1984 年 8 – 9 月洪水期、1996 年 5 – 6 月洪水期降雨径流观测资料对模型进行验证,从图 4 可看出,横塘村流量站计算流量与观测流量拟合较好,对于 1984 年洪水过程模拟的效率系数为 0.86,洪峰流量误差 3.8%,峰现时间误差为 0,对于 1996 年洪水过程模拟的效率系数为 0.93,洪峰流量误差 1.4%,峰现时间误差为 2 h.

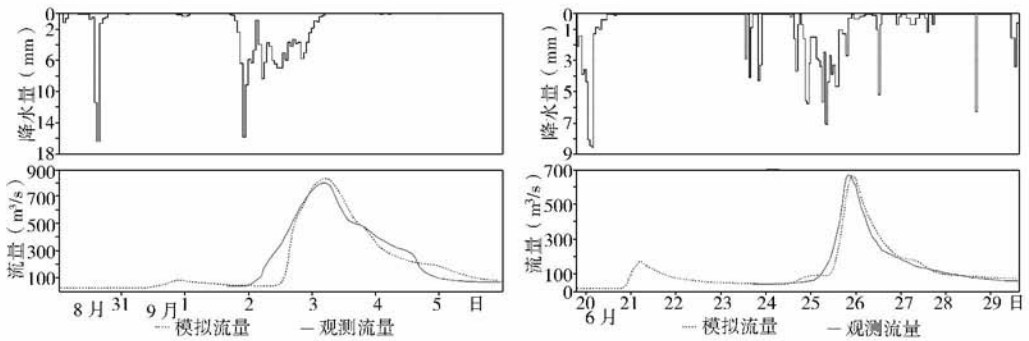


图 4 横塘村流量站模型验证时期降雨径流模拟(a:1984 年;b:1996 年)

Fig. 4 Precipitation, observed and simulated flow for validation period of River Xitiaoxi Basin at gate Hengtangcun

比较图 3、图 4 发现,模拟与观测流量过程线的误差主要表现在以下几个方面:1) 模拟洪峰流量比实测值偏高;2) 模拟洪水过程的起涨点比实测值到达的时间晚,并且起涨点到洪峰的时间短,表现为峰陡而尖;3) 退水段模拟比实测流量大、时间晚且速度快. 原因可能是模型未考虑到流域内除两大水库之外的水利设施如小型水库、电站和泵站对洪水的调蓄作用,导致对洪水的模拟陡涨陡落.

3 结论

采用分布式水文模型 HEC-HMS 对太湖上游西苕溪流域典型降雨洪水过程进行逐小时模拟,模拟结果表明,计算流量与观测流量具有良好的一致性,效率系数为 0.8 以上,洪峰流量误差低于 4%,峰现时间误差小于 2 h. 由于模型参数与下垫面的特征密切相关,此模型对于土地利用/覆被变化对极端水文事件的影响研究具有较好的应用前景.

4 参考文献

[1] 陈家其. 太湖流域历史旱涝规律及其趋势分析. 见:中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖流域水土资源与农业发展远景研究. 北京: 科学出版社, 1988:172 – 181.

[2] 毛 锐. 建国以来太湖流域三次大洪水的比较及对今后治理洪涝的意见. 湖泊科学, 2000,**12**(1): 12 – 18.

[3] 高俊峰. 太湖流域土地利用变化及洪涝灾害响应. 自然资源学报, 2002,**17**(2):150 – 156.

[4] 高俊峰,闻余华. 太湖流域土地利用变化对流域产水量的影响. 地理学报, 2002,**57**(2): 194 – 200.

[5] 孙顺才,黄漪平. 太湖. 北京:海洋出版社, 1993.

[6] US Army Corps of Engineers, USACE. HEC-HMS hydrologic modeling system user's manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. 2000.

[7] US Army Corps of Engineers, USACE. HEC-DSS user's guide and utility manuals. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. 1995.

[8] US Army Corps of Engineers, USACE. HEC-HMS geospatial hydrologic modeling extension user's manual.

Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. 2000.

[9] SCS. Urban hydrology for small watersheds. Washington, US Department of Agriculture (Technical Release, No. 55),1975.

[10] David C C *et al*. Comparing Spatial Distributions of Rainfall Derived from Rain Gages and Radar[EB/OL]. 1999. (http://www.onerain.com/includes/pdf/whitepaper/Spatial_Dist_of_Rainfall.pdf)

[11] Tung Y K. Point rainfall estimation for a mountainous region. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983,**109**(10): 86-93.

[12] Choi J Y, Engel B A, Chung H W. Daily streamflow modelling and assessment based on the curve-number technique. *Hydrological processes*, 2002,**16**: 3131-3150.

[13] Gumbo B, Munyamba N, Sithole G *et al*. Coupling of digital elevation model and rainfall-runoff Model in storm drainage network design. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002,**27**: 755-764.

[14] Sharma T, Satya Kiran P V, Singh T P *et al*. Hydrologic response of a watershed to land use changes: a remotesensing and GIS approach. *International Journal of Remote Sensing*, 2001,**22**(11): 2095-2108.

[15] 史培军,袁 艺,陈 晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. 生态学报, 2001,**21**(7): 1041-1049.

[16] 张建云. 地理信息系统及其在水文水资源中的应用. 水科学进展, 1995,**6**(4): 290-295.

[17] USDA-SCS (Department of Agriculture, Soil Conservation Service). National engineering handbook. Section 4:hydrology. Soil Conservation Service, USDA, Washington DC, 1985.

[18] Maidment D R. Handbook of Hydrology. NewYork: McGraw-Hill Book Company, 1992.

[19] Bhadurl B, Harbor J, Engel B *et al*. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS model. *Environmental Management*, 2000,**26**:643-658.

[20] Rango A. Assessment of Remote Sensing Input to Hydrologic Models. *Water Resources Bulletin*, 1985,**21**(3): 423-432.

[21] Linsley R K, Kohler M A, Paulhus L H. Hydrology for Engineers. New York: McGraw-Hill, 1982.

[22] Chaudhry H C. Open-channel flow. Prentice Hall, 1993.

[23] US Army Corps of Engineers, USACE. HEC-1 flood hydrograph package user's manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. 1998.

[24] USGS. Surface-water field techniques: Verified roughness characteristics of natural channels [EB/OL]. 2003. (http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/)

[25] Van Der Sande C J, De Jong S M, De Roo A P J. A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2003,**4**:217-229.

[26] US Army Corps of Engineers, USACE. HEC-HMS hydrologic modeling system technical reference manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. 2000.